

## La tectonique active et sismicité

### Introduction

La tectonique active englobe à la fois la déformation ductile liée essentiellement aux domaines des couvertures plissées, les zones profondes de la croûte et la déformation cassante liée aux systèmes de failles. Elle analyse ces déformations ainsi que les aléas sismiques dans les régions instables dont l'analyse des mouvements récents et actuels (néotectonique) est capitale pour la compréhension des dispositifs morphostructuraux et de l'activité sismique qui est concentrée le long des failles à proximité des frontières entre les plaques tectoniques. La morphologie quant à elle, permet de raisonner sur les grands volumes et sur des périodes plus longues afin de bien distinguer ce qui relève de la tectonique de ce qui revient à l'érosion différentielle. Même si l'ampleur de la dissection rend à priori difficile l'identification de surfaces enveloppes des déformations et en particulier des soulèvements, la recherche de paléformes <sup>(1)</sup> (surfaces de reliefs différenciés, réseaux hydrographiques...) pouvant servir de repères. C'est pourquoi l'analyse de modèles d'origine néotectonique est considérée comme un moyen d'identification des zones majeures de déformation actuelle.

### 1. Déformation ductile :

#### 1.1 Associations de plis et chevauchements :

Dans les domaines de couverture comme par exemple les chaînes sub-alpines ou les zones externes de la chaîne hercynienne, on a typiquement des associations de plis et de nappes. Les chevauchements sont souvent des flancs inverses étirés de plis.

Il y a un contraste rhéologique <sup>(2)</sup> important entre le socle et sa couverture (cassant / ductile), qui contrôle la géométrie du système. Le rôle mécanique de couches plus ou moins compétentes est important dans la morphologie des plis (penser à la dalle urgonienne dans les Alpes).

En allant vers des niveaux structuraux plus profonds, on a toujours des associations de plis et de chevauchements ; mais une importante schistosité se développe (plan axial, souvent parallèle aux chevauchements). Le rôle rhéologique d'une unité particulière s'amenuise, et on évolue vers un domaine purement ductile ou la tectonique cassante (failles et chevauchements) n'a plus guère de place.

---

(1): formes de relief anciennes.

(2) : (du grec rheo, couler et logos, étude) est l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée.

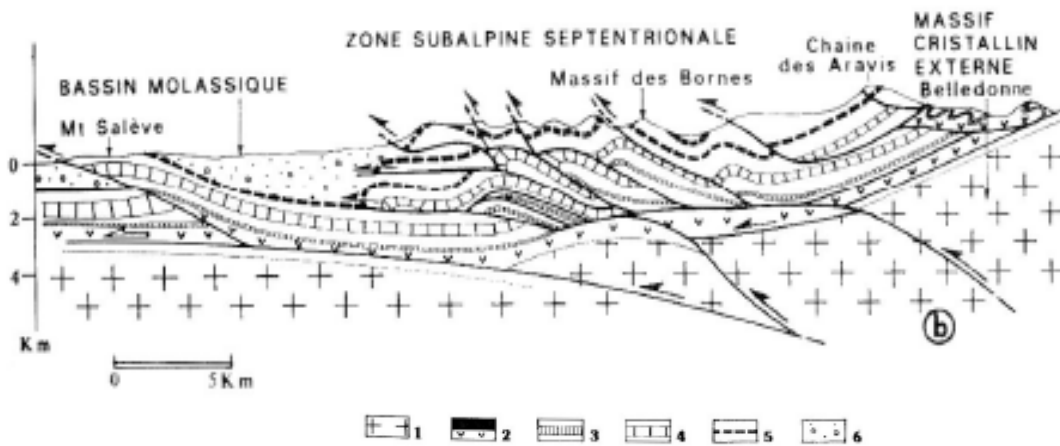


Fig. 01 Tectonique de couverture plissée sub-alpine.

### 1.2 Domaines profonds des zones déformées :

Dans les domaines profonds (à partir du faciès amphibolite), on est dans le domaine de la déformation purement ductile ; la déformation cassante est rare, limitée à par exemple des Pegmatites (pression de fluide importante). Les domaines structuraux profonds, au premier abord, se ressemblent : ce sont des zones de gneiss, plus ou moins déformés. Il est possible d'y identifier des zones de cisaillement ; une étude cinématique plus fine permet de se rendre compte que ces domaines ductiles peuvent enregistrer des associations structurales analogues à celles que l'on peut voir en domaine cassant : zones décrochantes ; zones compressives.

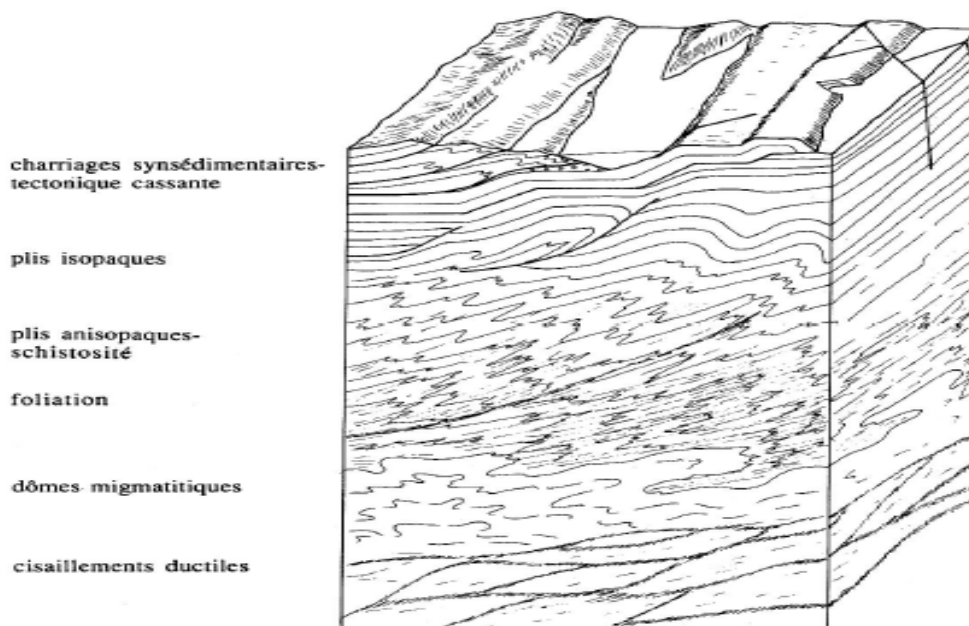


Fig. 02 Représentation schématique des styles tectoniques à différents niveaux structuraux.

## 2. Déformation cassante :

### 2.1 La rupture des roches (Mécanismes macro- et microscopiques) :

A l'échelle microscopique, la rupture implique de briser des liaisons atomiques. En théorie, c'est très difficile et devrait nécessiter une énergie (donc une contrainte) très supérieure à la contrainte observée pour la rupture des matériaux géologiques. A l'échelle d'un massif de roche, il existe de nombreuses fractures préexistantes (diaclasses, litage, anciennes failles, etc.), si bien que la déformation régionale implique plutôt la réactivation de fractures existantes que la formation de nouvelles ruptures. Mais il est, quand même, possible de casser une roche non-fracturée, et expérimentalement ceci ne nécessite pas des énergies compatibles avec la rupture de liaisons atomiques.

Pour la géométrie de la rupture, on s'appuie sur la méthode du cercle de Mohr (TD N°9) dont les principaux résultats sont:

- L'orientation des failles ou fractures par rapport à la contrainte varie en fonction de la pression de confinement (contrainte moyenne) et sont associées à des fentes de tension parallèles à  $\sigma_1$ .
- Pour des pressions crustales typiques, les failles sont orientées à  $30^\circ$  de part et d'autre de  $\sigma_1$  ; on a donc des systèmes de failles conjuguées avec un angle de  $60^\circ$  entre elles. Des failles normales ont ainsi un pendage typique de  $60^\circ$ , qui diminue avec la profondeur.

Pour des faibles pressions de confinement, la rupture se développe sans glissement, par des fissures perpendiculaires à  $\sigma_1$ , qui s'ouvrent dans la direction de  $\sigma_3$ . Ce sont des fentes de tension.

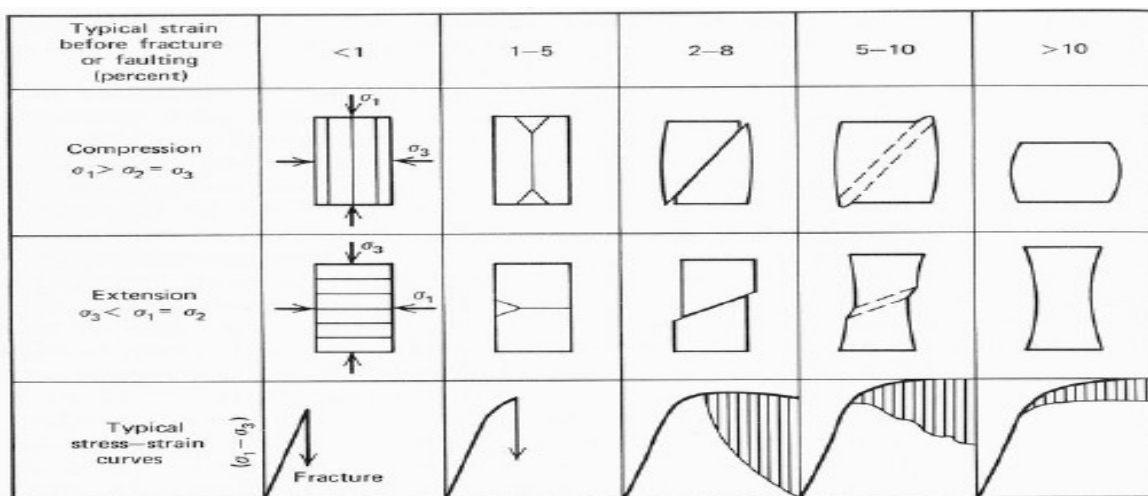


Fig. 03 Géométrie de la rupture, pour des pressions de confinement croissantes.

Pour des pressions de confinement plus élevées, il devient plus difficile d'ouvrir des fissures. La fracturation a lieu par glissement sur des plans de fracture après une déformation plastique.

## 2. 2 Joints, fractures et veines :

Les joints, fractures sont souvent les éléments géométriques les mieux visibles sur un affleurement ; il s'agit de fracturation cassante, sans déplacement (ou avec un déplacement minimal) sur les plans de rupture. Quand les systèmes de fracture sont remplis de minéraux (souvent quartz ou calcite), on parle de veine.

La plupart des masses rocheuses présentent une (ou plusieurs) fracturation(s) plus ou moins régulière, sans déplacement, qui le plus souvent définit la forme de l'affleurement : des joints ou diaclases. Il n'y a en général pas de déplacement sur les joints, ce sont donc des fractures tensiles (et pas de la rupture cisailante).

Les joints sont importants :

- En hydrologie: ils définissent la perméabilité en grand d'un réservoir ;
- En géotechnique, génie civil et minier, etc. : ils définissent la solidité d'une masse rocheuse ;

En géomorphologie : ils définissent souvent les principales directions du relief.

Les joints sont des fractures tensiles et leur origine peut varier :

- ✓ Fracturation tectonique (on a dans ce cas des systèmes conjugués de joints, dans des directions compatibles avec le champ de contrainte régional) ;
- ✓ Fracturation par relâchement des contraintes (post-tectonique);
- ✓ Fracturation hydraulique (eau libérée par la cristallisation d'un pluton ; dans ce cas, on a souvent des systèmes de veines de quartz ou de pegmatites, qui remplissent la fracturation, et qui définissent deux systèmes, radial et concentrique) ;
- ✓ Fracturation par érosion et remontée à la surface (compétition entre compression des roches qui se refroidissent.

## 2.3 Les failles :

Les failles sont des surfaces sur lesquelles a eu lieu un déplacement. Ce sont des fractures cisailantes dont les principales formes sont :

### 2.3.1 Failles normales

- Le déplacement sur une faille normale est proche de la ligne de plus grande pente du plan de faille;

- Le mur descend relativement au toit ;
- Ce sont des failles en extension ( $\sigma_3$  horizontal, perpendiculaire a la faille,  $\sigma_1$  vertical), leur pendage typique est de  $60^\circ$ .

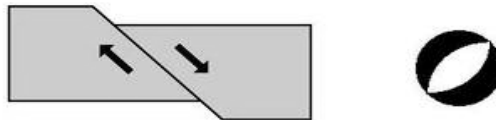
### 2.3.2 Failles inverses

- Le déplacement sur une faille inverse est aussi dans la ligne de plus grande pente;
- Le mur monte par rapport au toit ;
- La stratigraphie est répétée de part et d'autre de la faille ;
- Ce sont des failles en compression ( $\sigma_1$  horizontal,  $\sigma_3$  vertical) ; en théorie elles devraient avoir un angle de  $30^\circ$ .

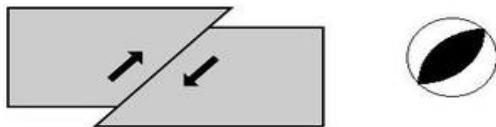
### 2.3.3 Failles décrochantes

- Les failles décrochantes ont un mouvement essentiellement horizontal.
- On parle de décrochement pour une faille décrochante à peu près verticale.

- les failles normales : elles résultent de mouvement d'écartement (divergence) qui entraîne un étirement des roches initiales



- les failles inverses : elles résultent de mouvement de rapprochement (convergence) qui entraîne un raccourcissement des terrains initiaux



- les failles en décrochement : elles provoquent un déplacement des blocs uniquement dans le sens horizontal (vue du dessus)

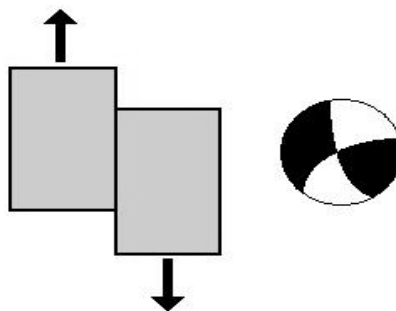


Fig.04 Les formes de failles

## TD N°10 Déformations et contraintes

### 1. Les déformations

En géologie, « déformation » est un terme générique qui décrit les changements de forme, de position ou d'orientation d'un corps soumis à des contraintes. C'est le seul élément que l'on peut décrire à partir d'objets géologiques.

La déformation peut se décrire comme une combinaison de 4 composants :

- Translation ;
- Rotation ;
- Distorsion (ou déformation interne) ;
- Changements de volume.

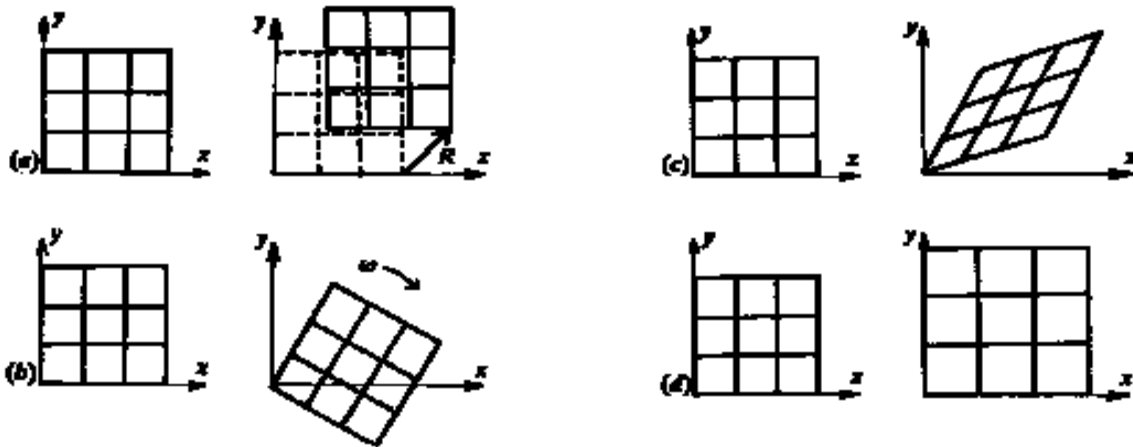


Fig.05 Types de déformation : a) translation, b) rotation, c) distorsion, d) dilatation.

Déformation interne (distorsion) est le composant le plus important de la déformation, pour les géologues. Nous allons parler de la déformation linéaire caractérisée par un allongement dans un sens, raccourcissement dans l'autre, comme un élastique qu'on étend ou une boule de pâte à modeler qu'on écrase. On peut le quantifier de plusieurs façons :

- Allongement relatif, ou extension (élongation) :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad \varepsilon : \text{est négatif dans le cas de raccourcissement.}$$

- Etirement:  $S = \frac{l_f}{l_0} = 1 + \varepsilon$

Et de déformation cisailante (ou angulaire) :

De la même façon une déformation angulaire peut se mesurer par l'angle que font deux droites initialement orthogonales : le cisaillement angulaire.

On utilise aussi la déformation cisailante; ils sont reliés par  $g = \tan\phi$ .

La vitesse (ou taux) de déformation est un paramètre important ; on peut le quantifier par :

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

(C'est la dérivée de la quantité de déformation par rapport au temps, notée avec un point en physique). Elle s'exprime en  $s^{-1}$ .

Faute de pouvoir accéder à la dérivée, on peut l'approcher par  $\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\Delta T}$

La déformation est dite homogène si des lignes initialement parallèles le restent après la déformation. On parle sinon de déformation hétérogène, ce qui est d'ailleurs le cas général dans la nature.

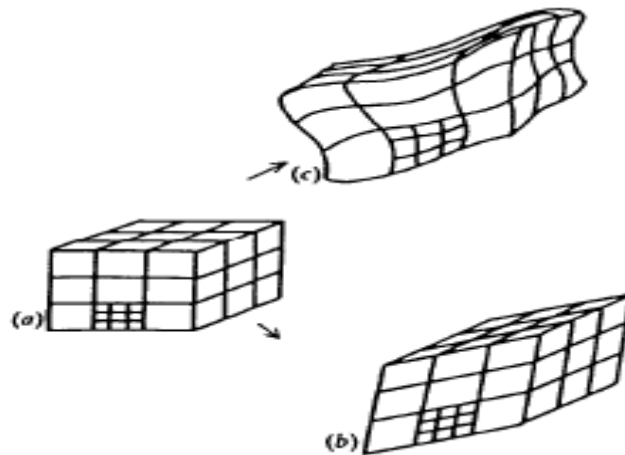


Fig.06 Déformation homogène et hétérogène

La déformation est continue si ses propriétés varient progressivement dans l'objet déformé (pli) ; elle est discontinue sinon (faille).

## 2. Les contraintes

Définition : une force exercée sur une surface exerce une contrainte :  $\vec{\sigma} = \frac{\vec{F}}{s}$ .

Une contrainte est homogène à une pression et s'exprime en Pa (unité SI) ;

Une contrainte, contrairement à une pression, est un vecteur.

Bien qu'une contrainte soit orientée, elle se transmet à l'ensemble de la roche sur laquelle elle est appliquée. Si on considère un volume de roche auquel on applique une force ; et un plan dans ce volume de roche (une fracture).

On peut décomposer la force (ou la contrainte) appliquée a ce plan en :

- Une contrainte normale, perpendiculaire au plan ;
- Une contrainte tangentielle, dans le plan.

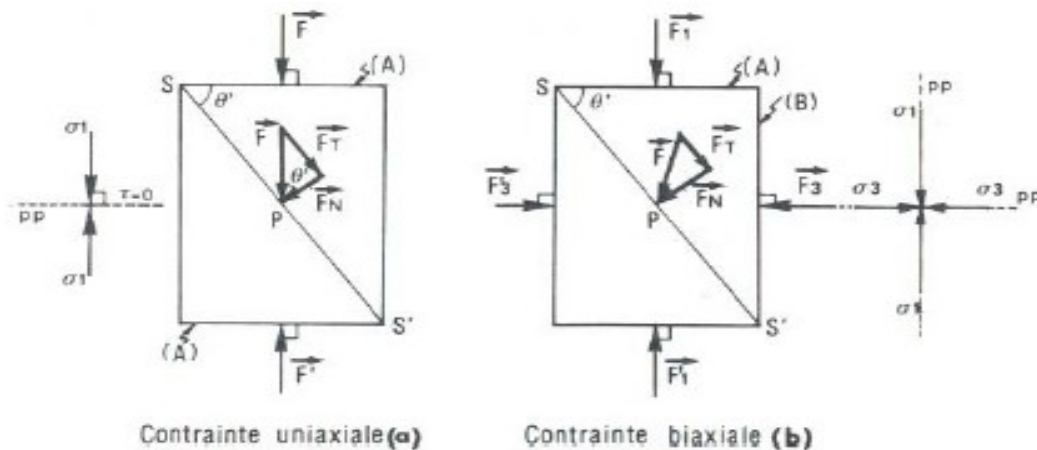


Fig.07 Décomposition d'une force appliquée à un volume de roche. (a), contrainte uniaxiale ;(b), contrainte bi-axiale.

La contrainte varie selon l'angle du plan, de façon relativement complexe, puisque la même force est distribuée sur un plan plus ou moins grand selon son orientation (c'est aussi un intérêt d'utiliser les contraintes plutôt que les forces, c'est une mesure indépendante de la surface).

La composante normale de la force  $\vec{F}$  vaut  $F_N = F \cdot \cos \theta$ . Elle s'applique sur la surface  $SS'$  qui vaut  $A / \cos \theta$ .

On a donc : 
$$\sigma_N = \frac{F}{A} \cos^2 \theta$$

De la même façon, la contrainte cisailante ( $\sigma_s, \tau$ ) vaut 
$$\tau = \frac{F}{A} \sin \theta \cdot \cos \theta$$

Dans les deux cas, notez que  $F/A$  est  $s$ , la contrainte appliquée a l'extérieur de l'objet.



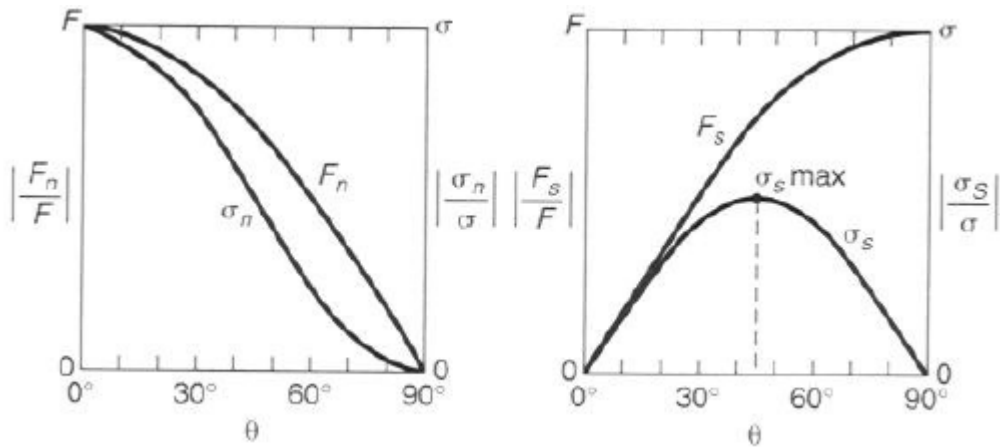


Fig.08 Variation des forces et contraintes normales et cisailantes en fonction de  $\theta$ .

Notez l'existence d'une direction particulière ( $\theta = 0$ , c'est le plan perpendiculaire à F) pour lequel la contrainte normale est maximale et vaut  $\bar{\sigma}$ .